

УДК 621.436 – 634.5

Г.М. Кухарёнок, д.т.н., проф. (Белоруссия)  
В.А. Бармин, к.т.н., доц. (Белоруссия)

## ВЛИЯНИЕ СМЕСЕВОГО БИОТОПЛИВА НА РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ДИЗЕЛЯ

*Приведены результаты математического моделирования рабочего процесса дизеля с учётом физико-химических свойств смеси дизельного топлива с метиловым эфиром рапсового масла различного состава. Определено влияние смесового биотоплива на экологические и динамические показатели процесса сгорания, характеристики выгорания топлива и индикаторные показатели цикла.*

*Наведено результати математичного моделювання робочого процесу дизеля з урахуванням фізико-хімічних властивостей суміші дизельного палива з метиловим ефіром рапсового масла різного складу. Визначено вплив сумішевого біопалива на екологічні та динамічні показники процесу згорання, характеристики вигорання палива й індикаторні показники циклу.*

*Results of mathematical modelling of working process of a diesel engine with the account fiziko - chemical properties of a mix of diesel fuel with a methyl aether raps oils. Are resulted influence of a mix of biofuel on ecological and dynamic indicators about process of combustion, characteristics of burning out of fuel and display indicators of a cycle is defined.*

### Введение

Мировой опыт производства и применения альтернативных топлив показывает, что одним из перспективных направлений является использование в качестве моторного топлива смесей с дизельным топливом или в чистом виде метилового эфира жирных кислот (МЭЖК) рапсового масла. Эти топлива по своим физико-химическим свойствам отличаются от традиционного топлива, что приводит к изменению протекания процессов в цилиндре двигателя.

### Анализ исследований и публикаций

Метиловый эфир жирных кислот рапсового масла нашел широкое применение в качестве биотоплива для дизельных двигателей по сравнению с рапсовым маслом [1]. Это объясняется тем, что по своим основным физико-химическим свойствам МЭЖК гораздо ближе к дизельному топливу чем рапсовое масло. По некоторым параметрам МЭЖК, даже превосходит дизельное топливо: цетановое число выше на 22 %, а содержание серы меньше на 90 %. К тому же МЭЖК, как и рапсовое масло, несет слабую биологическую нагрузку, при попадании на землю практически полностью распадается [2].

В европейских странах действует стандарт ЕН 590: 2004, допускающий содержание в дизельном топливе МЭЖК (FAME) до 5 % по объему. На его основе разработан и введен в действие государственный стандарт РБ СТБ 1658–2006 “Топлива для двигателей внутреннего сгорания”. Топливо дизельное. Технические требования и методы испытаний”.

Основным достоинством МЭЖК является суммарное уменьшение токсичности выхлопа.

При сгорании биотоплива в двигателях с открытой камерой сгорания в атмосферу выделяется на 10–12 % меньше  $\text{CO}_2$ , на 10–35 % меньше  $\text{CH}_4$ , на 24–36 % меньше твердых частиц, на 52–50 % меньше сажи и лишь на 8–12 % увеличивается оксид азота по сравнению с использованием обычного минерального дизельного топлива. При использовании биотоплива незначительно (до 5%) снижается мощность двигателя и увеличивается расход топлива [3].

В выхлопных газах дизельных двигателей, которые работают на биотопливе, совсем отсутствует сера, являющаяся причиной выпадения кислотных дождей.

Применение чистого МЭЖК в качестве дизельного топлива сдерживает его низкая химическая стабильность и высокая агрессивность.

Испытания, проведенные зарубежными производителями дизельной топливной аппаратуры, показали, что разложение топлива возможно в самой системе топливоподачи [2].

При работе дизельного двигателя на смесовом биотопливе падение мощности ниже, а экологические показатели по сравнению с дизельным топливом улучшаются.

В результате выполненных стендовых испытаний установлено, что в присутствии МЭЖК (10–25 %), снижается эмиссия углеводородов и  $\text{CO}$ , а интенсивность образования оксидов азота остается без изменения.

Анализ исследований и публикаций показывает, что экспериментальные исследования применения биотоплива для дизельных двигателей проводились на стендах и в эксплуатационных условиях с целью определения их экологических показателей. При этом недостаточно рассматривалось влияние смесового биотоплива на рабочий процесс дизеля.

### Постановка задачи

Решение вопроса о возможности применения биотоплив связано с проведением исследовательских работ по оценке их влияния на экологические и динамические показатели процесса сгорания, характеристики выгорания топлива и индикаторные показатели цикла.

Для исследования рабочего процесса при работе на биотопливах необходимо совершенствование математических моделей путем включения в расчетные методики новых факторов, учитывающих состав и физико-химические свойства топлив.

С этой целью была разработана математическая модель рабочего процесса дизеля, основанная на уравнении первого закона термодинамики с учетом влияния добавки метилового эфира на показатели смесового топлива и проведены расчетные исследования [4].

Первый этап расчетных исследований предполагал калибровку математической модели для получения адекватных значений выходных величин и оценки возможностей использования модели для проведения расчетных исследований рабочего процесса дизельного двигателя.

Расчетные показатели сравнивались с результатами индизирования двигателя, выполненными на Минском моторном заводе.

Основные параметры рабочего процесса (максимальное давление и температура цикла, удельный индикаторный расход топлива и среднее индикаторное давление), полученные при обработке индикаторных диаграмм и расчетным путем, отличаются на 1...3 %.

Изменения коэффициента избытка воздуха и условной продолжительности сгорания, протекание интегральных характеристик выгорания топлива, определенные при моделировании рабочего процесса, сохраняют тенденции характерные для результатов экспериментальных исследований.

Разработанная математическая модель рабочего процесса дизельного двигателя, учитывающая физико-химические свойства применяемых топлив, и процессы, протекающие в цилиндре при сгорании биотоплив, может быть использована для оценки влияния свойств смесовых топлив на индикаторные показатели дизеля.

### Расчетные исследования

Расчетные исследования рабочего процесса дизеля 4ЧН 11/12,5 с литровой мощностью 18 кВт/л были проведены на скоростных режимах

$n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ ;

$n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ ;

$n = 1200 \text{ мин}^{-1}$

при полной подаче топлива и постоянной величине угла опережения впрыскивания топлива – 3 град поворота коленчатого вала (ПКВ).

Расчеты выполнены для дизельного топлива и его смесей с метиловым эфиром рапсового масла соответственно 5; 10; 20; 30; 50; 75 % концентрации по массе, а также при использовании чистого эфира.

В качестве оценочных показателей работы дизеля на смесовых топливах были взяты экономические, экологические и динамические показатели рабочего процесса.

Расчетные индикаторные диаграммы и зависимости изменения температуры газов в цилиндре для номинального режима работы дизеля на топливах с различной концентрацией МЭЖК показывают, что применение метилового эфира ведет к увеличению максимальных давлений цикла на всех рассмотренных режимах работы дизеля. Наиболее высокая величина максимального давления соответствует работе дизеля на «чистом» МЭЖК. По отношению к дизельному топливу это увеличение составляет:

– при  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$  0,97 МПа (9 %);

– при  $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$  2,02 МПа (17,4 %);

– при  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  0,5 МПа (4,8 %).

Увеличение давлений происходит на фоне уменьшения теплотворности применяемых топлив, и увеличения коэффициента избытка воздуха. Однако снижения максимальных температур, в соответствии с уменьшением теплотворности и коэффициента избытка воздуха не происходит.

Максимальная температура цикла при применении 50 % смеси и «чистого» метилового эфира для скоростного режима  $2200 \text{ мин}^{-1}$  увеличивается примерно на 2–2,5 %.

При частоте вращения  $1600 \text{ мин}^{-1}$  различия в максимальных температурах возрастают.

Для 50 % смеси и метилового эфира эта разница по сравнению с максимальной температурой, соответствующей дизельному топливу, составляет примерно 2,5–3 %.

Для оценки влияния максимальных температуры и давления цикла, коэффициента избытка воздуха на увеличение выбросов азота  $M_{NO_x}$  для  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$  была использована следующая регрессионная зависимость:

$$M_{NO_x} = -54,06 + 8,06 \cdot \alpha - 0,86 \cdot \alpha^2 + 0,047 T_z - 1,1 \cdot 10^{-5} T_z^2 + 0,53 p_z - 0,018 p_z^2 - 7,04 p_i + 3,035 p_i^2,$$

где

$\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;

$T_z$  – максимальная температура сгорания, К;

$p_z$  – максимальное давление сгорания, МПа;

$p_i$  – среднее индикаторное давление, МПа.

Результаты расчетов показали, что примерное увеличение окислов азота при применении 50 % смеси на номинальном режиме работы составит 4...5 %, а для метилового эфира 6...7 %.

Применение метилового эфира и его 50 % смеси с дизельным топливом смещает момент достижения температурой газов своего максимума в сторону верхней мёртвой точки (ВМТ).

Раннее достижение температурой своего максимума, а также снижение теплотворности метилового эфира и смесей с высокой его концентрацией обуславливают уменьшение температуры и давления конца выпуска.

Вид диаграмм температуры и давления определен характером протекания процесса сгорания.

Характерной особенностью дифференциальных характеристик выгорания топлив  $dx/d\phi$  является наличие двух максимумов.

Наиболее четко это выражено при работе двигателя с частотой вращения 1200 и 2200  $\text{мин}^{-1}$ .

Наиболее высокие значения максимальной скорости выгорания топлива соответствуют скоростному режиму  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ , что определяет сокращение продолжительности сгорания.

Снижение максимальной скорости выгорания дизельного топлива  $dx/d\phi_{\max}$  при увеличении частоты вращения составляет 18,4 % для  $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ .

При частоте вращения  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$  величина  $dx/d\phi_{\max}$  снижается на 28,5 %. Время достижения скоростью выгорания топлива своего максимума, отсчитанное от ВМТ составляет:

– для  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  1,53 мс;

– для  $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$  1,35 мс;

– для  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$  1,21 мс.

Уменьшение временного интервала свидетельствует об интенсификации процессов смесеобразования и сгорания с увеличением частоты вращения, что в значительной мере сопряжено с изменением характеристик впрыскивания топлива и газодинамического состояния воздушного заряда. Однако по углу ПКВ период достижения скоростью сгорания своего максимума увеличивается. Такое изменение скорости сгорания обуславливает снижение максимальной температуры при увеличении частоты вращения коленчатого вала.

Уменьшение величины  $dx/d\phi_{\max}$  при работе двигателя на смеси, содержащей 30 % метилового эфира, при увеличении частоты вращения составляет:

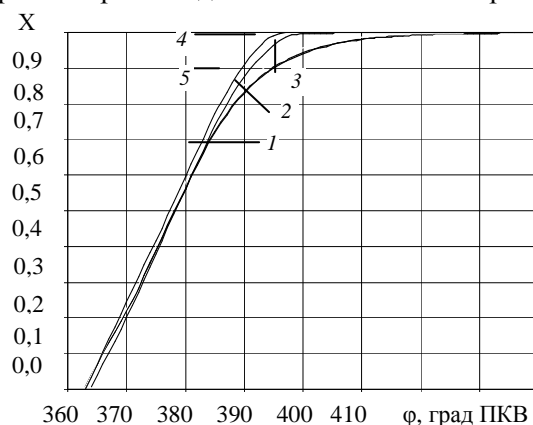
– для  $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$  10 %;

– для  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$  27,1 %.

Абсолютные значения максимальных скоростей выгорания топлива при работе на смесевом топливе для рассматриваемых режимов работы дизеля несколько ниже.

Время достижения параметром  $dx/d\phi$  своих максимальных значений при работе на 5 и 30 % смеси не отличается от этого же параметра при работе на дизельном топливе.

Интегральные характеристики для номинального режима работы двигателя показаны на рисунке.



Интегральная характеристика выгорания топлива при применении дизельного, смесевых топлив и метилового эфира ( $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ ):

1 – дизельное топливо;

2 – 5 % метилового эфира;

3 – 30 % метилового эфира;

4 – 50 % метилового эфира;

5 – 100 % метилового эфира

Выгорание в цилиндре смеси дизельного топлива и 30 % метилового эфира протекает достаточно интенсивно и равномерно.

Несмотря на более низкие значения максимальной скорости выгорания биотоплива, содержащего 30 % метилового эфира, при работе на скоростных режимах  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$  и  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ , продолжительность выгорания 80 % цикловой подачи сокращается на  $\sim 2$  град ПКВ.

Продолжительность сгорания топлива  $\varphi_z$  по мере снижения частоты вращения коленчатого вала уменьшается:

- при  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$   $\varphi_z = 83 \dots 88$  град ПКВ;
- при  $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$   $\varphi_z = 80 \dots 84$  град ПКВ;
- при  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$   $\varphi_z = 75 \dots 80$  град ПКВ.

Меньшие значения соответствуют 30 % смеси.

Раннее воспламенение, невысокие значения скоростей выгорания и сокращение продолжительности сгорания топлива обусловлены изменением физико-химических свойств смесового топлива.

Особенности развития процессов сгорания отразились на выходных показателях цикла.

Несмотря на увеличение максимальных значений температуры и давления цикла при росте концентрации метилового эфира в смеси и при использовании чистого эфира показатели индикаторной экономичности цикла ухудшились (см. таблицу).

#### Результаты расчетных исследований рабочих процессов дизеля ( $N_{e_d} = 18 \text{ кВт/л}$ )

Топливо	$n$ $\text{мин}^{-1}$	$P_{\max}$ , МПа	$\eta_i$	$g_i$ , г/кВт·ч	$T_{\max}$ , К
Дизельное	2200	10,748	0,4543	186,4	1962
	1600	11,605	0,4698	180,3	2074,1
	1200	10,434	0,47	180,2	2299,4
Смесь 5%	2200	10,756	0,455	187,3	1990,3
	1600	11,142	0,4648	183,4	2079,2
	1200	10,452	0,4704	181,2	2313,2
Смесь 30%	2200	10,821	0,4582	192,2	1994,4
	1600	11,295	0,4687	187,9	2092,1
	1200	10,492	0,4734	186	2328,8
Смесь 50%	2200	10,985	0,4618	198,7	2036,3
	1600	12,75	0,4746	191,9	2088
	1200	10,506	0,4793	190,6	2345,6
Метилловый эфир	2200	11,718	0,4754	207	2057,1
	1600	12,927	0,4807	203,4	2138,1
	1200	10,942	0,4806	203,5	2381,1

По сравнению с дизельным топливом среднее эффективное давление при применении метилового эфира уменьшилось на 0,126 МПа (11,2 %) при частоте вращения коленчатого вала двигателя

2200  $\text{мин}^{-1}$ . Его уменьшение на смесевых топливах обусловлено меньшей теплотворностью, этот показатель для метилового эфира на 14,5% меньше дизельного топлива.

Расчетный анализ показателей рабочего цикла дизеля 4ЧН 11/12,5 с литровой мощностью 23 кВт/л при работе на различных топливах показал, что протекание индикаторных диаграмм, графиков температуры, а также дифференциальных и интегральных характеристик выгорания топлива идентично рассмотренным ранее.

Сохранились ранее установленные закономерности изменения индикаторных показателей.

Форсирование по мощности привело к снижению уровня удельного индикаторного расхода топлива, увеличению максимальных давлений и температур цикла.

#### Выводы

В исследованных рабочих процессах применение смесей дизельного топлива и метилового эфира с концентрацией до 5% не приводит к ухудшению мощностных и экономических показателей. Значения максимальных температур и давлений незначительно отличаются. Дальнейший рост содержания метилового эфира в смеси ведет к снижению мощности и увеличению расхода топлива. При этом возрастают максимальные давления и температуры цикла.

#### Литература

1. Девянин С.Н., Марков В.А., Семёнов В.Г. Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей. – Х.: Новое слово, 2007. – 600с.
2. Марков В.А., Гайворонский А.И., Девянин С.Н., Пономарёв Е.Г. Рапсовое масло как альтернативное топливо для дизелей // Автомобильная промышленность. – 2006. – № 2. – С. 1–3.
3. Гречкін О.М. Досвід застосування біодизельного палива // Матеріали I Міжнарод. наук.-техн. конф. “Проблеми хімотології”. – К.: Кн. вид-во НАУ, 2006. – С. 154 – 156.
4. Кухарёнок Г.М., Петрученко А.Н. Особенности моделирования рабочего цикла дизеля при работе на смесевых топливах // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. посвящённой 55-летию автодорожного факультета БНТУ «Современный транспорт и транспортные средства». – Мн.: БНТУ, 2007. – С. 85–88.